

## ANALISIS KESTABILAN PONDASI JEMBATAN STUDI KASUS : JEMBATAN ESSANG-LALUE

**Julfrenly Onding Lapis**

**S. Balamba, O. B. A. Sompie, Alva N. Sarajar**

Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Sam Ratulangi Manado

email: [julfrenly@rocketmail.com](mailto:julfrenly@rocketmail.com)

### ABSTRAK

*Secara struktural jembatan dipisahkan menjadi bangunan atas dan bangunan bawah. Sesuai fungsinya, bangunan bawah jembatan menopang dan meneruskan beban dari bangunan atas jembatan ke lapisan tanah yang kuat dan stabil/solid. Bangunan bawah jembatan terdiri dari abutmen dan pondasi, dimana abutmen bisa juga berfungsi sebagai pondasi jembatan. Ketinggian abutmen minimum 1 m di atas tinggi air saat banjir, sedangkan kedalaman minimum ditentukan dengan menghitung kedalaman gerusan.*

*Metode yang digunakan untuk analisis kestabilan abutmen pada penelitian ini adalah metode pendekatan berdasarkan IRC78/1983. Tahap perancangan abutmen, seperti pada struktur dinding penahan tanah pada dasarnya menggunakan sistim coba-coba (trial), kemudian dianalisa kestabilannya dengan syarat harus memenuhi nilai faktor keamanan  $FS_{Geser} > 1.5$ ,  $FS_{Guling} > 1.5$ ,  $FS_{DDT} > 3$ .*

*Pada contoh kasus jembatan Essang-Lalue direncanakan abutmen dengan ketinggian 3.46m dari permukaan tanah, dan tertanam sedalam 5,54m. Hasil analisis kestabilan pada abutmen menyatakan bahwa tanah dapat menahan gaya geser, dan guling yang bekerja pada struktur, tetapi daya dukung tanah tidak dapat memikul struktur diatasnya, sehingga diperlukan pondasi dibawahnya. Pondasi yang dianalisis adalah pondasi kaisan diameter 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, dan 5.0m. Dari hasil analisis, pondasi kaisan dengan diameter 4.0, 4.5, dan 5.0 m, adalah pondasi yang bisa menahan beban-beban struktur bangunan atas jembatan, dan abutmen.*

**Kata kunci : Kestabilan terhadap geser, guling, daya dukung, penurunan**

### PENDAHULUAN

Jembatan adalah salah satu prasarana yang penting dalam kehidupan masyarakat, karena selain sebagai penghubung untuk memperlancar transportasi antara dua ataupun lebih daerah yang terpisah oleh sungai dan lembah, dengan adanya jembatan secara tidak langsung dapat meningkatkan pertumbuhan perekonomian di suatu daerah.

Secara struktur jembatan dipisahkan menjadi dua bagian, dimana ada struktur Bangunan Atas Jembatan dan Struktur Bangunan Bawah Jembatan. Dalam perencanaannya, Badan Standarisasi Nasional (BSN) telah mengeluarkan standar beragam untuk struktur Bangunan Atas Jembatan baik itu Konstruksi Jembatan Beton Bertulang contohnya dalam buku "Norma, Standar, Pedoman dan Manual (NPSM) Kimpraswil"

edisi Mei 2003, maupun untuk Konstruksi Jembatan Rangka Baja seperti terdapat dalam buku Pedoman Gambar Standar Rangka Baja Bangunan Atas Jembatan Kelas A dan B, sedangkan Struktur Bangunan Bawah Jembatan yang terdiri dari pangkal jembatan (Abutmen), pilar/pier (jika ada) dan pondasi jembatan, perencanaannya harus disesuaikan dengan lokasi dan kondisi setempat.

Masalah yang umum ditemui dalam konstruksi jembatan adalah terjadinya kegagalan struktur, contohnya seperti pada kasus jembatan Amurang, dimana akibat terjadi penurunan pada Struktur Bangunan Bawah Jembatan, walaupun tanpa ada kerusakan berarti pada Struktur Bangunan Atas Jembatan, secara keseluruhan struktur jembatan menjadi miring, tidak aman untuk dilalui, dan tidak menutup kemungkinan, jembatan akan runtuh secara total.

Dengan demikian, untuk menghindari hal-hal tersebut perlu dipelajari cara mendisain, dan menganalisis Struktur Bangunan Bawah Jembatan. Sesuai fungsinya, struktur bangunan bawah jembatan adalah untuk menopang dan meneruskan beban dari Struktur Bangunan Atas Jembatan dan beban-beban yang bekerja disekitarnya ke lapisan tanah yang kuat dan stabil/solid. Keseluruhan dari proses ini disebut analisis kestabilan pondasi jembatan.

Dengan dilakukannya survey langsung, adanya data tanah, dan data kecepatan aliran sungai pada lokasi, maka Jembatan Essang-Lalue dijadikan sebagai objek untuk studi kasus dalam penelitian ini.

### Perumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dari penelitian ini adalah bagaimana caranya mendesain dan menganalisis struktur bangunan bawah jembatan sesuai dengan kondisi dilokasi pembangunan.

### Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini sekiranya adalah:

1. Bagaimana cara menganalisis dan menghitung beban yang bekerja dikeseluruhan struktur jembatan?
2. Bagaimana merencanakan abutmen jembatan yang stabil?
3. Bagaimana cara merencanakan pondasi jembatan yang stabil dan yang mampu memikul beban yang bekerja diatasnya sesuai dengan kondisi tanah setempat?

### Pembatasan Masalah

Penelitian ini dibatasi oleh:

1. Tidak melakukan survey transportasi.
2. Tidak merencanakan struktur bangunan atas jembatan
3. Tidak melakukan survey dan analisis hidrologi secara mendetail.
4. Tidak melakukan pemeriksaan material dasar sungai.
5. Tidak memperhitungkan biaya konstruksi
6. Pondasi kaisan hanya dianalisis terhadap tanah homogeny.
7. Tidak menghitung penulangan abutmen dan pondasi
8. Tidak memperhitungkan pengaruh terhadap gempa secara vertikal

## LANDASAN TEORI

### Daya Dukung Tanah

Terzaghi menemukan rumus praktis menghitung daya dukung tanah sebagai berikut (Das, 2007):

1. Untuk pondasi menerus  

$$q_u = cN_c + qN_q + 0.5 \gamma B N_\gamma \quad (1)$$

2. Untuk pondasi persegi  

$$q_u = 1.3 cN_c + q.N_q + 0.5 \gamma .B.N_\gamma \quad (2)$$

3. Untuk pondasi lingkaran  

$$q_u = 1.3 c.N_c + q.N_q + 0.3 \gamma .B.N_\gamma \quad (3)$$

dengan:

$q_u$  = daya dukung tanah ultimit

$B$  = lebar pondasi

$D$  = kedalaman pondasi

$\gamma$  = besar volume tanah

$c$  = kohesi tanah

$\phi$  = sudut geser tanah

$N_c$ ,  $N_q$ , dan  $N_\gamma$  adalah faktor daya dukung tanah (*bearing capacity factors*) yang besarnya tergantung dari sudut geser tanah seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 1.

Tabel 1 Koefisien Daya Dukung Dari Terzaghi

$\phi$	$N_c$	$N_q$	$N_\gamma$	$\phi$	$N_c$	$N_q$	$N_\gamma$
0	5.70	1.00	0.00	26	27.09	14.21	9.84
1	6.00	1.10	0.01	27	29.24	15.90	11.60
2	6.30	1.22	0.04	28	31.61	17.81	13.70
3	6.62	1.35	0.06	29	34.24	19.98	16.18
4	6.97	1.49	0.10	30	37.16	22.46	19.13
5	7.34	1.64	0.14	31	40.41	25.28	22.65
6	7.73	1.81	0.20	32	44.04	28.52	26.87
7	8.15	2.00	0.27	33	48.09	32.23	31.49
8	8.60	2.21	0.35	34	52.64	36.50	38.04
9	9.09	2.44	0.44	35	57.75	41.44	45.41
10	9.61	2.69	0.56	36	63.53	47.16	54.36
11	10.16	2.98	0.69	37	70.07	53.80	65.27
12	10.76	3.29	0.85	38	77.5	61.55	78.61
13	11.41	3.63	1.04	39	85.97	70.61	95.03
14	12.11	4.02	1.26	40	95.66	81.27	115.31
15	12.86	4.45	1.52	41	106.81	93.85	140.51
16	13.68	4.92	1.82	42	119.67	108.75	171.99
17	14.60	5.45	2.18	43	134.58	126.50	211.56
18	15.12	6.04	2.59	44	151.95	147.74	261.60
19	16.56	6.70	3.07	45	172.28	173.28	325.34
20	17.69	7.44	3.64	46	196.22	204.19	407.11
21	18.92	8.28	4.31	47	224.55	241.80	512.84
22	20.27	9.19	5.09	48	258.28	287.85	650.67
23	21.75	10.23	6.00	49	298.71	344.63	831.99
24	23.36	11.40	7.08	50	347.50	415.14	1072.80
25	25.13	12.72	8.34				

Sumber: Das (2007)

### Dinding Penahan Tanah dan Abutmen

Analisis kestabilan dinding penahan tanah dihitung sebagai berikut (Das, 2007):

#### 1. Stabilitas terhadap guling

Faktor keamanan digunakan untuk memastikan keamanan suatu struktur dinding penahan tanah terhadap penggulingan ( $FS_{\text{overtuning}}$ ) > antara 2-3, dimana:

$$FS_{(\text{overtuning})} = \frac{\sum M_l}{\sum M_g} > (2-3) \quad (4)$$

dengan:

$\sum M_g$  = Total momen yang dapat mengakibatkan penggulingan

$\sum M_l$  = Total momen yang melawan penggulingan

#### 2. Stabilitas terhadap penggeseran

Faktor keamanan yang digunakan untuk memastikan keamanan struktur terhadap pergeseran ( $FS_{\text{sliding}}$ ) adalah:

$$FS_{\text{sliding}} = \frac{\sum V}{\sum H} \geq 1.4 - 1.5 \quad (5)$$

Dengan:

$\sum V$  = Total gaya yang menahan penggeseran

$\sum H$  = Total gaya yang menyebabkan penggeseran

#### 3. Stabilitas terhadap daya dukung tanah.

Faktor keamanan untuk memastikan keamanan struktur terhadap daya dukung tanah ( $FS_{\text{bearing capacity}}$ ) adalah:

$$FS_{\text{bearing capacity}} = \frac{q_u}{q_{(\text{max})}} \quad (6)$$

### Pembebanan Jembatan

#### 1. Beban Primer

##### **Beban mati**

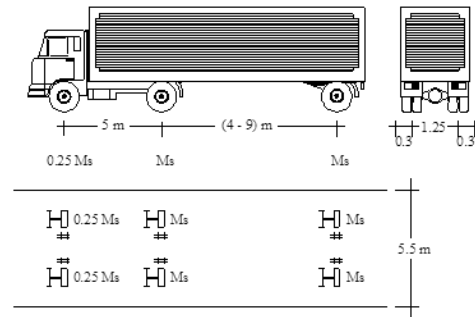
Beban mati dari bangunan adalah berat dari bagian tersebut dan elemen-elemen struktural lain yang dipikulnya. Termasuk dalam hal ini adalah berat bahan dan bagian jembatan yang merupakan elemen struktural, ditambah dengan elemen non struktural yang dianggap tetap.

##### **Beban hidup**

##### - Beban T

Beban "T" adalah beban yang merupakan kendaraan truk yang mempunyai roda ganda (*dual wheel load*) sebesar 20 ton dengan ukuran serta

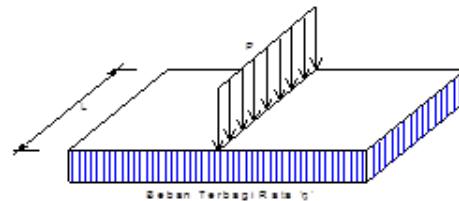
kedudukan seperti yang tertera pada Gambar 1.



Gambar 1 Pemodelan Pembebanan Truk  
Sumber: Supriadi dan Muntohar (2007)

##### - Beban D

Untuk perhitungan kekuatan gelagar-gelagar harus digunakan beban "D". Beban "D" atau beban jalur adalah susunan beban pada setiap jalur lalu lintas yang terdiri dari beban terbagi rata sebesar "q" ton per meter panjang per jalur, dan beban garis "P" ton per jalur lalu lintas tersebut. Beban "D" seperti tertera pada Gambar 2



Gambar 2 Distribusi Beban "D" yang Bekerja Pada Jembatan  
Sumber: Supriadi dan Muntohar (2007)

##### - Beban Pada Trotoar, kerb dan sandaran

Kerb yang terdapat pada tepi-tepi lantai kendaraan harus diper-hitungkan untuk menahan suatu beban horizontal ke arah melintang jembatan sebesar 500 kg/m yang bekerja pada puncak kerb yang bersangkutan atau pada tinggi 25 cm di atas permukaan lantai kendaraan apabila kerb yang bersangkutan lebih tinggi dari 25 cm.

**Beban kejut**

Koefisien kejut ditentukan dengan rumus:

$$k = 1 + 20/((50 + L)) \quad (7)$$

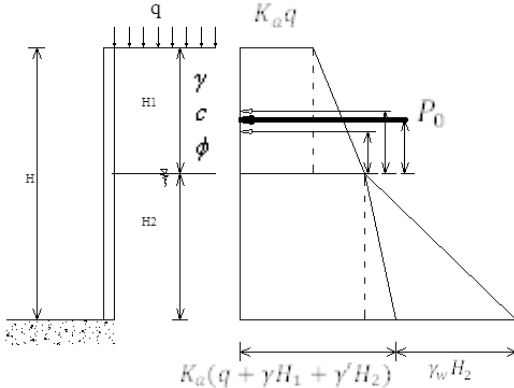
dengan :

k : koefisien kejut, dan

L : panjang bentang dalam meter, ditentukan oleh konstruksi jembatan (keadaan statis) dan kedudukan muatan garis "P"

Koefisien kejut tidak diperhitungkan terhadap bangunan bawah apabila bangunan bawah dan bangunan atas tidak merupakan kesatuan.

Bila bangunan atas dan bangunan bawah merupakan satu kesatuan maka koefisien kejut diperhitungkan terhadap bangunan bawah.

**Beban akibat tekanan tanah**

Gambar 3 Gaya Akibat Tekanan Tanah Aktif

dengan:

q = Beban merata yang bekerja di atas tanah

$K_0 = 0.95 - \sin$

$\gamma$  = Berat Jenis Tanah Lapis 1

$\gamma'$  = Berat jenis tanah lapis 2

$\gamma_w$  = Berat jenis air

c = Kohesi

P = Sudut geser tanah

H1 = Tinggi lapisan tanah 1

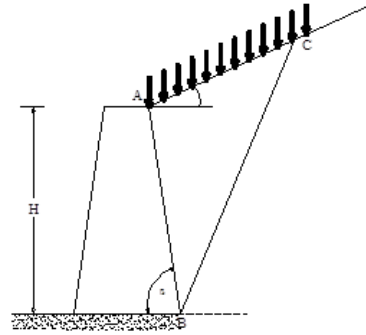
H2 = Tinggi lapisan tanah 2

$P_0$  = Tekanan tanah aktif

$K_a$  = Koefisien tekanan tanah aktif

H = Tinggi dinding penahan tanah

Koefisien tekanan tanah aktif  $K_a$  pada dinding penahan tanah menurut teori Coulomb:



Gambar 4 Tekanan Tanah Aktif Coulomb

Tekanan Tanah aktif dirumuskan (Das, 2007) sebagai berikut:

$$K_a = \frac{\sin^2(\beta + \phi)}{\sin^2 \beta \sin(\beta - \delta) \left[ 1 + \frac{\sin(\delta + \phi) \sin(\phi - \alpha)}{\sin(\beta - \delta) \sin(\alpha + \beta)} \right]^2} \quad (8)$$

dengan :

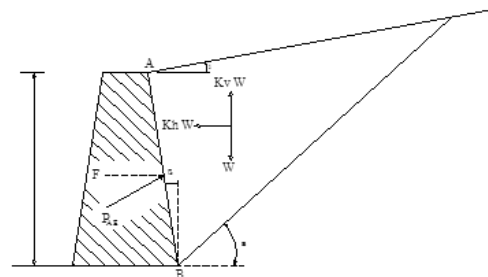
$\phi$  = Sudut geser tanah

$\delta$  = Sudut geser antara dinding dan tanah, dapat diambil nilainya antara  $\frac{\phi}{2}$  sampai  $\frac{2}{3}\phi$

$\beta$  = Kemiringan dinding penahan tanah terhadap bidang vertikal

$\alpha$  = Kemiringan tanah terhadap bidang horizontal

Tekanan tanah aktif pada dinding penahan tanah akibat gempa menurut teori Mononobe-Okabe (Das, 1993):



Gambar 5 Tekanan Tanah Aktif Akibat Gempa Mononobe-Okabe

$$P_{AE} = \frac{1}{2} \gamma H^2 (1 - k_v) K_{AE} \quad (9)$$

dimana:

$K_{AE}$  = Koefisien tekanan tanah aktif akibat pengaruh gempa

$$= \frac{\cos^2(\phi - \theta - \beta)}{\cos(\theta) \cos^2 \cos(\delta + \beta + \theta) \left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi - \theta - \beta)}{\cos(\delta + \beta + \theta) \cos(\phi - \beta)}} \right]^2} \quad (10)$$

$$k_v = \frac{\text{akselerasi gempa arah vertikal}}{9.81} \quad (11)$$

$$k_h = \frac{\text{akselerasi gempa arah horizontal}}{9.81} \quad (12)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{k_h}{1 - k_v} \right) \quad (13)$$

$\delta$  = Sudut geser antara dinding penahan dan tanah, dan biasa diasumsikan antara  $\frac{\phi}{2}$  sampai  $\frac{2\phi}{3}$

$P_{AE}$  = Tekanan tanah aktif akibat gempa pada kedalaman x

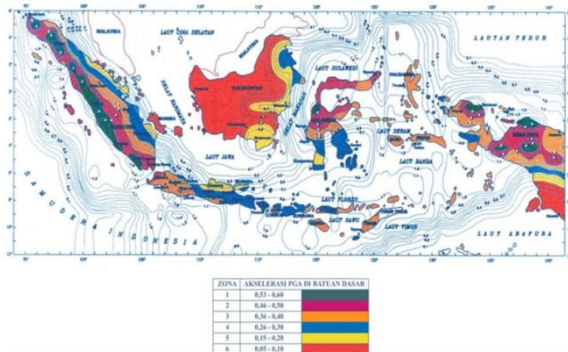
$\gamma$  = Berat isi tanah

### Analisis gempa

Analisis gempa secara rinci tidak harus dilakukan untuk jembatan dengan bentang tunggal sederhana. Bagaimanapun bangunan atas dan bangunan bawah direncanakan menahan gaya inersia, yaitu perkalian antara reaksi beban mati dan koefisien gempa.

Peraturan yang selama ini berlaku, menggunakan koefisien geser dasar plastis dimana termasuk faktor daktilitas rata-rata sebesar 4 dan faktor resiko 1 serta redaman 5%, sehingga dapat langsung digunakan oleh perencana dalam menentukan nilai koefisien gempa untuk analisis statis.

Koefisien gempa Indonesia dapat dilihat dari tabel pada Gambar 6 (SNI 2833-2008):



Gambar 6. Peta wilayah gempa Indonesia untuk periode ulang 500 tahun

## 2. Beban sekunder

### Beban angin

Dalam menghitung jumlah luas bagian-bagian sisi jembatan yang terkena angin dapat digunakan ketentuan-ketentuan sebagai berikut

- Untuk jembatan gelagar penuh diambil sebesar 100% luas sisi jembatan yang terkena angin, ditambah 50% luas bidang sisi lainnya,
- Untuk jembatan rangka diambil sebesar 30 % luas bidang sisi jembatan yang langsung terkena angin ditambah 15 % luas sisi-sisi lainnya.

### Gaya akibat perbedaan suhu

Pada umumnya pengaruh perbedaan suhu tersebut dapat dihitung dengan mengambil perbedaan suhu :

- Perbedaan suhu maksimum-minimum = 35° C
- Perbedaan suhu antara bagian-bagian jembatan = 15° C

### Gaya rangkai dan susut

Pengaruh rangkai dan susut bahan beton terhadap konstruksi, harus ditinjau. Besarnya pengaruh tersebut apabila tidak ada ketentuan lain, dapat dianggap senilai dengan gaya yang timbul turunnya suhu sebesar 15° C.

### Gaya rem dan traksi

Pengaruh ini diperhitungkan senilai dengan pengaruh gaya rem sebesar 5% dari beban "D" tanpa koefisien kejutan yang memenuhi semua jalur lalu lintas yang ada dalam satu jurusan.

### Gaya gesekan pada tumpuan yang bergerak

Jembatan pula harus ditinjau terhadap gaya yang timbul akibat gesekan pada tumpuan bergerak. Karena adanya pemuaian dan penyusutan dari jembatan akibat perbedaan suhu atau akibat-akibat lain.

Gaya gesek yang timbul hanya ditinjau akibat beban mati saja. Sedang besarnya ditentukan berdasarkan koefisien gesek pada tumpuan yang bersangkutan dengan nilai sebagai berikut:

- Tumpuan rol baja
  - Dengan satu atau dua rol.....0,01
  - Dengan tiga atau lebih rol.....0,05

- Tumpuan gesekan
    - Antara baja dengan campuran tembaga keras dan baja.. ....1,25
    - Antara baja dengan baja atau besi tuang.....0,25
    - Antara karet dengan baja/beton.....0,15-0,18
- Tumpuan-tumpuan khusus harus disesuaikan dengan persyaratan spesifikasi dari pabrik material yang bersangkutan atau didasarkan atas hasil percobaan dan mendapat persetujuan dari pihak yang berwenang. (Supriadi dan Muntohar, 2007).

### 3. Beban Khusus

#### ***Gaya aliran dan tumbukan benda-benda hanyutan***

Semua pilar dan bagian-bagian lain dari bangunan jembatan yang mengalami gaya-gaya aliran air, harus diperhitungkan dapat menahan gaya-gaya aliran air, harus diperhitungkan dapat menahan tegangan-tegangan maksimum akibat gaya-gaya tersebut.

Gaya tekanan aliran adalah hasil perkalian tekanan air dengan luas bidang pengaruh pada suatu pilar, yang dihitung dengan rumus: (Supriadi dan Muntohar, 2007)

$$A_h = k \times V_a^2 \quad (14)$$

dengan :

A<sub>h</sub> = Tekanan aliran (ton/m<sup>2</sup>)

V<sub>a</sub> = Kecepatan aliran yang dihitung berdasarkan analisa hidrologi (m/detik), bila tidak ditentukan maka: V<sub>a</sub> = 3m/ detik

K = Koefisien aliran yang tergantung bentuk pilar

### **Syarat Ruang Bebas Jembatan**

#### 1. Profil ruang bebas jembatan

Yang dimaksud dengan profil bebas jembatan adalah tinggi dan lebar ruang bebas jembatan dengan ketentuan :

- Tinggi minimum jembatan tertutup adalah 5 m,
- Lebar minimum untuk jembatan ditetapkan menurut jumlah jalur lalu lintas (B) ditambah dengan kebebasan samping minimum 2x0,50 meter

#### 2. Tinggi bebas minimum

Tinggi bebas minimum terhadap banjir 50 tahunan ditetapkan sebesar 1,00 meter. Untuk sungai-sungai yang mempunyai karakteristik khusus, tinggi bebas disesuaikan dengan keperluan berdasarkan penelitian lebih lanjut. . (Supriadi dan Muntohar, 2007).

#### 3. Kedalaman minimum abutmen

Kedalaman minimum abutmen adalah perkiraan letak kedalaman abutmen yang tanpa terpengaruh oleh kemungkinan terjadinya gerusan (*scouring*) akibat aliran air dan material bawaan sungai yang bisa menyebabkan kerusakan pada struktur bangunan bawah jembatan.

Sesuai IRC 5-1970, (Phatak, 1995) rumus berikut dapat digunakan untuk menentukan kedalaman gerusan yang normal ketika berhadapan dengan saluran alami dengan material dasar sungai yang tidak beraturan.

$$d_{sm} = 1.34 \left( \frac{Db^2}{K_{sf}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (15)$$

dimana :

d = Kedalaman gerusan normal dalam meter di bawah permukaan air banjir yang sesuai dengan nilai Q

Q = Debit rencana dalam m<sup>3</sup>/detik

f = Faktor lumpur yang mewakili sampel dari bahan dasar

Db= Debit dalam meter kubik air per meter luas

M = Diameter dalam mm

K<sub>sf</sub>= Faktor material yang mewakili material dasar

dm = Berat material dasar dalam diameter inchi

### **Kombinasi Pembebanan**

Konstruksi jembatan beserta bagian-bagiannya harus ditinjau terhadap kombinasi pembebanan dan gaya yang mungkin bekerja. Sesuai dengan sifat-sifat serta kemungkinan-kemungkinan pada setiap beban, tegangan yang digunakan dalam pemeriksaan kekuatan konstruksi yang bersangkutan dinaikkan terhadap tegangan yang diijinkan sesuai keadaan elastis (Tabel 2).



Tabel 2 Kombinasi Pembebanan dan Gaya

Kombinasi Pembebanan dan Gaya	Tegangan yang digunakan dalam persen terhadap tegangan ijin keadaan elastis
1. $M + (H+K) + Ta$	100%
2. $M + Ta + Ah + Gg + A + SR$	125%
3. $Kombinasi(1) + Rm + Gg + A + SR + Tm + S$	140%
4. $M + Gh + Tag + Gg + Agh + Tu$	150%
5. $M + Pl$	130%
6. $M + (H+K) + Ta + S + Tb$	150%

Sumber: Supriadi dan Muntohar (2007).

### Pondasi Kaison

Pondasi kaison merupakan jenis peralihan antara pondasi dangkal dan pondasi dalam. Istilah kaison digunakan untuk menggambarkan bentuk pondasi yang berupa silinder atau persegi, dengan atau tanpa pembesaran pada ujungnya.

Kapasitas ultimit netto tiang tunggal ( $Q_u$ ), adalah jumlah dari tahanan bawah ultimit ( $Q_b$ ) dan tahanan gesek ultimit ( $Q_s$ ) antara dinding tiang dan tanah disekitarnya dikurangi dengan berat sendiri tiang ( $W_p$ ). Bila dinyatakan dalam persamaan (Cristady, 2008), maka:

$$Q = Q_b + Q_s - W_p \quad (16)$$

dengan :

$W_p$  = Berat sendiri tiang

$Q_s$  = Kapasitas ultimit netto

Tahanan ujung ultimit, secara pendekatan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan kapasitas dukung pondasi dangkal, sebagai berikut:

$$q_u = \frac{Q_b}{A_b} = c_b N_c + p_b N_q + 0.5 \gamma d N_\gamma \quad (17)$$

dengan :

$A_b$  = Luas penampang kaison

$C$  = Kohesi

$P_b$  = Berat tanah di atas kaison

$d$  = Diameter kaison

$N_c$ ,  $N_q$ , dan  $N_\gamma$  adalah parameter daya dukung tanah

### Penurunan Pondasi (Bowles, 1997)

Persamaan besarnya penurunan total ( $St$ ) yang terjadi adalah :

$$St = Si + Scp \quad (18)$$

dimana :

$St$  = Penurunan Total

$Si$  = Penurunan Seketika

$Scp$  = Penurunan Konsolidasi Primer

Rumus penurunan seketika (*Immediately Settlement*) dikembangkan berdasar teori dari Timoshenko dan Goodier (1951) sebagai berikut :

$$Si = qB \frac{1-\mu^2}{Es} Iw \quad (19)$$

dimana :

$q_0$  = Besarnya tegangan kontak

$B$  = Lebar pondasi

$Iw$  = Faktor pengaruh yang tergantung dari bentuk pondasi dan kekakuan pondasi

$\mu$  = Angka poisson

$Es$  = Sifat elastis tanah

Penurunan konsolidasi primer ( $Scp$ )

$$Scp = Cr \frac{H}{1+e_0} \log \frac{P_c}{P_0} + Cc \frac{H}{1+e_0} \left( \log \frac{P_0 + \Delta\sigma}{P_0} \right) \quad (20)$$

Dimana :

$\Delta\sigma$  = Tambahan tegangan

$e_0$  = Initial void ratio

$Cc$  = Compression index

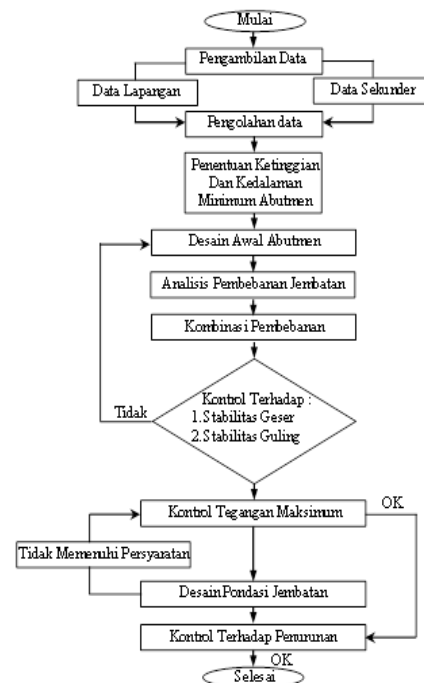
$\Delta P$  = Tegangan efektif pada tanah berlapis

$Cr$  = Compression index pada kondisi over konsolidasi

$H$  = Tinggi lapisan yang mengalami konsolidasi

$P_c$  = Preconsolidation pressure

### BAGAN ALIR PENELITIAN



## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Data Pengukuran Jembatan dan Sungai

Tipe Jembatan Rangka Baja Kelas B-45

Panjang jembatan = 45,00m

Lebar jembatan = 7,35m

Lebar jalan = 6,00m

Lebar Trotoar = 0,50m

Lebar sungai = 37,80m

Kedalaman sungai ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3 Hasil Pengukuran Jarak dan Kedalaman Sungai

Titik	Jarak (m)	Kedalaman (m)
A – I	6,30	2,15
I – II	6,30	1,70
II – III	6,30	1,30
IV – V	6,30	1,30
V – B	6,30	1,30
Total	37,80	

### Pengukuran Beda Tinggi

1. Antara permukaan jalan dengan muka air saat banjir = 3,20 m
2. Antara permukaan jalan dengan muka air normal = 4,21 m
3. Antara muka air normal dengan dasar sungai = 2,15 m
4. Antara muka air saat banjir dengan muka air normal = 1,01 m
5. Antara permukaan jalan dengan dasar sungai = 6,36 m
6. Antara dasar sungai dengan muka air saat banjir = 3,16 m

### Perhitungan Debit Aliran Sungai

Debit aliran sungai diperlihatkan pada berikut.

Tabel 4. Perhitungan Debit Sungai

No Sampel	Jarak(m)	Waktu (det)	m/det
1	10	8.73	0.87
2	10	8.26	0.83
3	10	9.35	0.94
4	10	8.41	0.84
5	10	8.44	0.84
6	10	9.4	0.94
7	10	9	0.9
8	10	9.18	0.92
9	10	9.43	0.94
10	10	8.51	0.85
Debit Rata-rata (m <sup>3</sup> /detik)			0.89

Dari hasil perhitungan kecepatan aliran air didapat debit rata-rata = 0.89 m<sup>3</sup>/detik.

### Hasil Pengujian Triaxial

Berdasarkan hasil pengujian tri-aksial yang sudah dilakukan di lokasi, didapatkan sifat-sifat tanah sebagai berikut:

$$c = 0.25 \text{ kg/cm}^2 = 0.25 \text{ t/m}^2$$

$$\gamma = 1.73 \text{ t/m}^3$$

$$G_s = 2.68 \text{ t/m}^3$$

$$\gamma_{sat} = \frac{(G_s + e) \cdot \gamma_w}{1 + e}$$

$$= \frac{(2.68 + 1.361) \cdot 0.981}{1 + e}$$

$$= 1.79 \text{ t/m}^3$$

$$\phi = 14$$

Dan dengan melihat Tabel 1. didapatkan parameter daya dukung tanah Terzaghy:

$$N_c = 12.11$$

$$N_q = 4.02$$

$$N_\gamma = 1.26$$

### Analisis Pembebanan Jembatan

Tabel 5 Total Gaya yang Bekerja pada Struktur Jembatan

No	Beban	Beban (ton)	
		V	H
I	Beban Primer		
a.	Beban Mati		
	- Berat Sendiri Jembatan	182.02	
	- Berat Sendiri Abutmen	552.26	
b.	Beban Hidup		
	- Beban Hidup Pada Trotoar	5.63	
	- Beban T	2.11	
	- Beban D	30.39	
	- Beban Hidup Dengan Kejut	38.13	
c.	Tekanan Tanah		
	- Tekanan Tanah Aktif Dengan Beban Merata q		63.23
	- Tekanan Tanah Aktif Saat Gempa Dengan Beban Merata q		66.22
II	Beban Sekunder		
a.	Beban Angin		2.86
b.	Gaya Akibat Perubahan Suhu		0.14
c.	Gaya Rem	0.72	
d.	Gaya Akibat Gempa Pada Struktur		41.88
III	Beban Khusus		
	Gaya Air dan Tumbukan Benda-benda hanyutan		3.40

### Perhitungan Penentuan Ketinggian dan Kedalaman Minimum Abutmen

#### 1. Batas ketinggian

- Tinggi bebas minimum untuk terhadap banjir kala ulang 50 tahun = 1.00m
- Beda tinggi antara permukaan jalan dengan muka air saat banjir (a) = 3.20m
- Jarak yang dibutuhkan struktur jembatan rangka baja dari permukaan perkerasan sampai ke perletakan di abutmen (b) = 1.50 m

Dicoba:

Ketinggian abutmen disejajarkan dengan tinggi permukaan jalan, maka

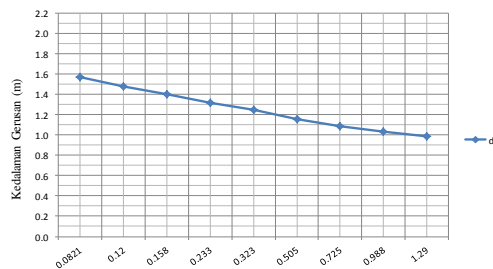


$$\begin{aligned}
 a - b &> 1 \text{ m} \\
 &= 3.20 - 1.5 \text{ m} > 1 \text{ m} \\
 &= 1.7 \text{ m} > 1 \text{ m} \dots \text{Ok}
 \end{aligned}$$

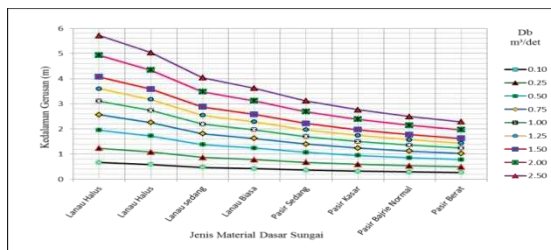
## 2. Kedalaman

Tabel 6 Hasil Perhitungan Kedalaman Gerusan Berdasarkan Ukuran Material Dasar Sungai

Jenis Material	dm	ksf	d <sub>sm</sub>
lanau halus	0.0821	0.5	1.559
lanau halus	0.12	0.6	1.467
lanau halus	0.158	0.7	1.393
lanau sedang	0.233	0.85	1.306
lanau biasa	0.323	1	1.237
pasir sedang	0.505	1.25	1.148
pasir kasar	0.725	1.5	1.081
pasir bajrie normal	0.988	1.75	1.027
pasir berat	1.29	2	0.982



Gambar 7 Grafik Hubungan Antara Ukuran Butiran Material Dengan Kedalaman Gerusan

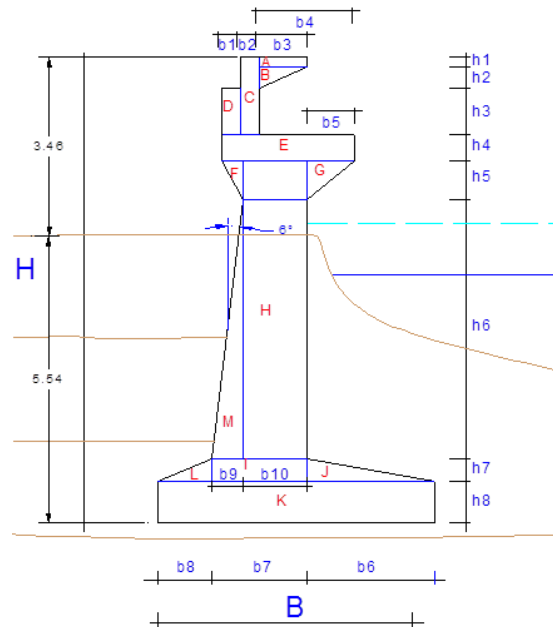


Gambar 8. Grafik Pengaruh V terhadap Gerusan pada Tiap-tiap Material

## Desain Abutmen

Tabel 8. Dimensi Penampang Abutmen

Penampang	Panjang (m)	Penampang	Panjang (m)
H	9.00	B	5.60
h1	0.20	b1	0.30
h2	0.40	b2	0.30
h3	0.90	b3	0.80
h4	0.50	b4	2.45
h5	0.75	b5	0.75
h6	5.00	b6	2.80
h7	0.45	b7	1.70
h8	0.80	b8	1.10
h9	0.60	b9	0.50
h10	1.40	b10	1.20



Gambar 9 Dimensi Abutmen

Tabel 7. Pengaruh Db Terhadap Gerusan Pada Tiap-tiap Material

V(m³)/det	Lanau Halus	Lanau Halus	Lanau sedang	Lanau Biasa	Pasir Sedang	Pasir Kasar	Pasir Bajrie Normal	Pasir Berat
0.10	0.668	0.589	0.472	0.423	0.365	0.323	0.292	0.267
0.25	1.231	1.085	0.869	0.780	0.672	0.595	0.537	0.491
0.50	1.954	1.722	1.380	1.238	1.066	0.945	0.853	0.780
0.75	2.560	2.256	1.808	1.622	1.397	1.239	1.117	1.022
1.00	3.102	2.733	2.191	1.965	1.693	1.501	1.353	1.238
1.25	3.599	3.171	2.542	2.280	1.964	1.741	1.571	1.437
1.50	4.064	3.581	2.871	2.574	2.218	1.966	1.774	1.623
2.00	4.923	4.338	3.477	3.119	2.687	2.382	2.148	1.966
2.50	5.713	5.034	4.035	3.619	3.118	2.764	2.493	2.281

**Perhitungan Daya Dukung Tanah**

Daya dukung tanah di bawah abutmen dengan rumus daya dukung Terzaghi:

$$q_{ult} = 1.3c \cdot N_c + q N_q + 0.5 \gamma \cdot B \cdot N_\gamma$$

dimana :

$$\begin{aligned} c &= 0.25 \text{ t/m}^3 \\ \gamma &= 1.73 \text{ t/m}^3 \\ \gamma_{sat} &= 1.79 \\ q &= \gamma \cdot D = 15.80 \text{ t/m} \\ \phi &= 14 \\ N_c &= 12.11 \\ N_q &= 4.02 \\ N_\gamma &= 1.26 \\ b &= 5.6 \\ q_{ult} &= 109.20 \text{ t/m}^2 \\ q_{ijin} &= \frac{q_{ult}}{F.K} ; F.K = 3 \\ &= \frac{109.20}{3} = 36.40 \text{ t/m}^2 \end{aligned}$$

**Kombinasi Pembebanan dan Gaya****Kombinasi I**

(tegangan yang digunakan = 100% tegangan ijin)

Gaya-gaya yang bekerja :

M = Beban mati jembatan dan abutmen  
(H+K) = Beban hidup dengan kejut

Ta = Tekanan tanah

Kontrol terhadap :

Guling

$$\Sigma M_L = 2869.27 \text{ tm}$$

$$\Sigma M_G = 209.05 \text{ tm}$$

$$FS = \frac{2869.27}{209.05} = 13.72 > 1.5 \dots \text{Ok}$$

Geser

$$FS = \frac{772.41 \cdot 0.2493}{62.90} = 3.06 > 1.5 \dots \text{Ok}$$

Daya dukung tanah terhadap pondasi

$$e = 0.64 < B/6 (0.93) \dots \text{Ok}$$

$$q_{max} = 233.11 \text{ t/m}^2$$

$$FS = \frac{36.40}{233.11} = 0.16 < 3 \dots \text{Tanah tidak}$$

mampu menahan tegangan pada ujung abutmen

$$q_{min} = 44.90 \text{ t/m}^2$$

$$FS = \frac{36.40}{44.90} = 0.94 < 3 \dots \text{Tanah tidak}$$

mampu menahan tegangan pada pangkal abutmen

**Kombinasi II**

(Tegangan yang digunakan = 125% dari tegangan ijin)

Gaya-gaya yang bekerja:

M = Beban mati jembatan dan abutmen  
Ta = Tekanan tanah  
A = Beban Angin

Tabel 9. Kombinasi Pembebanan I

Segment	Beban V (ton)	Beban H (ton)	Jarak H (m)	Jarak V (m)	Momen Guling (tm)	Momen Lawan (tm)
Berat sendiri jembatan	182.02		2.80			509.66
Abutmen	552.26		-			2252.86
(H+K)	38.13		2.80			106.75
TA		63.23		-	209.71	
Total	772.41	63.23			209.71	2869.27

Tabel 10. Kombinasi Pembebanan II

Segment	Beban V (ton)	Beban H (ton)	Jarak H (m)	Jarak V (m)	Momen Guling tm	Momen Lawan tm
Berat sendiri jembatan	182.02		2.80			509.66
Abutmen	552.26		-			2252.86
TA		63.23		-	209.71	
TEF		0.59		5.76	3.40	
SR		0.14		7.50		1.06
Total	734.28	63.82			213.11	2763.59

Tabel 11. Kombinasi Pembebanan III

Segment	Beban V (ton)	Beban H (ton)	Jarak H (m)	Jarak V (m)	Momen Guling tm	Momen Lawan tm
Berat sendiri jembatan	182.02		2.80			509.66
Abutmen	552.26		-			2252.86
(H+K)	38.13		2.80			106.75
TA		63.23		-	209.71	
R <sub>m</sub>		0.72		10.80	7.80	
SR		0.14	3.15		0.45	
A		18.23		10.69	194.77	
TEF		0.59		5.76	3.40	
Total	772.41	82.91			416.13	2869.27

Tabel 12. Kombinasi Pembebanan IV

Segment	Beban V (ton)	Beban H (ton)	Jarak H (m)	Jarak V (m)	Momen Guling tm	Momen Lawan tm
Berat sendiri jembatan	182.02		2.80			509.66
Abutmen	552.26		-			2252.86
TGAabt		41.88			152.02	
TAG		66.22		-	220.22	
Total	734.28	108.10			372.25	2762.52

Kontrol terhadap :

Guling

$$\Sigma M_L = 2763.59 \text{ tm}$$

$$\Sigma M_G = 212.45 \text{ tm}$$

$$FS = \frac{2763.59}{212.45} = 13.01 > 1.5 \dots \text{Ok}$$

Geser

$$FS = \frac{734.28 \times 0.2493}{63.49} = 2.88 > 1.5 \dots \text{Ok}$$

Daya dukung tanah terhadap pondasi

$$e = 0.67 < B/6 (0.89) \dots \text{Ok}$$

$$q_{max} = \left( \frac{732.79}{5.60} \right) \left( 1 + \frac{6 \times 0.67}{5.60} \right) = 225.86$$

FS = 0.16 < 3.... Tanah tidak mampu menahan tegangan pada ujung abutmen

$$q_{min} = \left( \frac{\Sigma V}{B} \right) \left( 1 - \frac{6e}{B} \right) = 36.50 \text{ t/m}^2$$

FS =  $\frac{34.40}{36.50} = 1.00 < 3 \dots$  Tanah tidak mampu menahan tegangan pada pangkal abutmen

**Kombinasi III**

(Tegangan yang digunakan 130% dari tegangan ijin)

Gaya-gaya yang bekerja :

Kombinasi I+R<sub>m</sub>+SR+A+TEFR<sub>m</sub> = Gaya Rem

Kontrol terhadap :

Guling

$$\Sigma M_L = 2869.27 \text{ tm}$$

$$\Sigma M_G = 415.47 \text{ tm}$$

$$FS = \frac{2869.27}{772.41} = 6.91 > 1.5 \dots \text{Ok}$$

Geser

$$FS = 2.33 > 1.5 \dots \text{Ok}$$

Daya dukung tanah terhadap pondasi

$$e = 0.38 < B/6 (0.89) \dots \text{Ok}$$

$$q_{max} = \left( \frac{\Sigma V}{B \times L} \right) \left( 1 + \frac{6e}{B} \right) = 193.62$$

FS =  $\frac{36.40}{193.62} = 0.19 < 3 \dots$  Tanah tidak mampu menahan tegangan pada ujung abutmen

$$q_{min} = \left( \frac{\Sigma V}{B} \right) \left( 1 - \frac{6e}{B} \right) = 82.24 \text{ t/m}^2$$

FS = 0.40 < 3.... Tanah tidak mampu menahan tegangan pada pangkal abutmen

**Kombinasi IV**

(Tegangan yang digunakan 135% dari tegangan ijin)

Gaya-gaya yang bekerja :

Berat sendiri jembatan dan abutmen

$T_{Gabt}$  = Beban akibat gempa pada abutmen

$TA_{GA}$  = Tekanan tanah disaat gempa

Kontrol terhadap :

Guling

$$\Sigma M_L = 2762.52 \text{ tm}$$

$$\Sigma M_G = 371.56 \text{ tm}$$

$$FS = \frac{2762.52}{371.56} = 7.44 > 1.5 \dots \text{Ok}$$

Geser

$$FS = \frac{732.25 \times 0.2493}{107.76} = 1.70 > 1.5 \dots \text{Ok}$$

Daya dukung tanah terhadap pondasi

$$e = 0.46 \dots < B/6 (0.89) \dots \text{Ok}$$

$$q_{max} = \left( \frac{734.28}{5.60} \right) \left( 1 + \frac{6 \times 0.46}{5.60} \right) = 195.21$$

$$FS = \frac{36.40}{195.21} = 0.19 < 3 \dots \text{Tanah tidak mampu menahan tegangan pada ujung abutmen}$$

$$q_{min} = \left( \frac{734.28}{5.60} \right) \left( 1 - \frac{6 \times 0.46}{5.60} \right) = 67.03 \text{ t/m}^2$$

$$FS = \frac{36.40}{67.03} = 0.54 < 3 \dots \text{Tanah tidak mampu menahan tegangan pada pangkal abutmen}$$

### Perencanaan Pondasi Kaison

Dari hasil perhitungan analisis dan perhitungan abutmen, abutmen mampu menahan gaya geser, dan guling, tetapi tanah tidak mampu memikul beban pada ujung maupun pangkal abutmen, sehingga abutmen harus diberi konstruksi tambahan berupa pondasi, pondasi yang dipilih adalah jenis pondasi kaison karena mengingat aksesibilitas ke lokasi jembatan yang sangat sulit untuk pengerjaan konstruksi jenis pondasi dalam lain seperti tiang pancang.

Perencanaan pondasi kaison dilakukan dengan data-data sebagai berikut :

#### a. Data konstruksi

1. Diameter kaison = 4,0 m
2. Konstruksi kaison menggunakan konstruksi beton bertulang dengan berat jenis 2,4 t/m<sup>3</sup> dan ketebalan 0,2 m
3. Isian kaison beton dengan berat jenis 2,0 t/m<sup>3</sup>

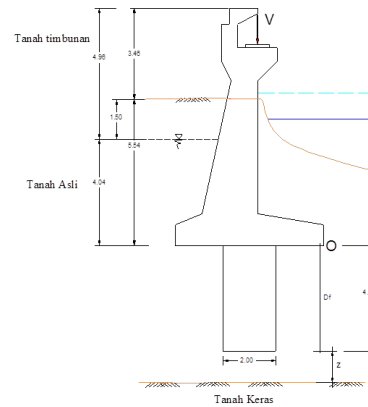
4. Kaison direncanakan memiliki kedalaman tertanam ( $D_f$ ) = 4,0 m dibawah abutmen.

#### b. Data tanah

Data tanah diambil berdasarkan hasil pengujian triaxial dengan asumsi bahwa tanah disekitar adalah tanah yang homogen dengan:

$$\begin{aligned} \gamma &= 1.73 \text{ t/m}^3 \\ G_s &= 2.68 \text{ t/m}^3 \\ \gamma_{sat} &= 1.79 \text{ t/m}^3 \\ \phi &= 14^\circ \\ c &= 2.5 \text{ t/m}^2 \\ C_c &= 0.33 \end{aligned}$$

Jarak antara kaison dengan permukaan tanah keras/batuan ( $z$ ) tidak diketahui



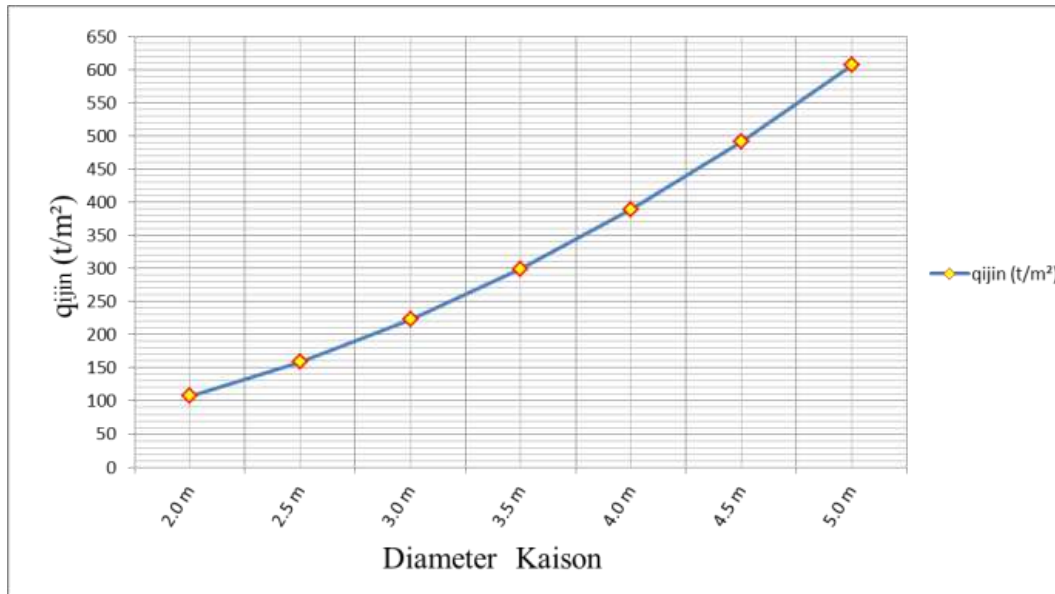
Gambar 10. Perencanaan Kaison

#### c. Daya dukung kaison

Dengan perhitungan daya dukung pondasi kaison, dibuat tabel dan grafik pengaruh diameter kaison terhadap daya dukung ijin untuk kaison diameter 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0 m sebagai berikut :

Tabel 12 Pengaruh Diameter Kaison Dukung Terhadap Daya Dukung Ijin

Diameter Sumuran (m)	$q_{ijin}$ (t/m <sup>2</sup> )
2.0 m	107.18
2.5 m	158.81
3.0 m	222.80
3.5 m	299.35
4.0 m	388.70
4.5 m	491.07
5.0 m	606.67



Gambar 11. Grafik Hubungan Pengaruh Diameter Kaison terhadap Daya Dukung Ijin

## d. Perhitungan jumlah kaison

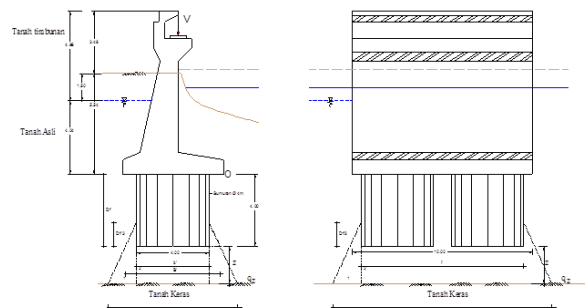
Tabel 13. Jumlah Kaison Minimum untuk Tiap Kombinasi Pembebanan

Diameter sumuran	Daya dukung		Jumlah Minimum Kaison			
	qult	q ijin	Kombinasi I	Kombinasi II	Kombinasi III	Kombinasi IV
2.0	363.64	121.21	6.37	6.06	6.37	6.06
2.5	540.20	180.07	4.29	4.08	4.29	4.08
3.0	752.35	250.78	3.08	2.93	3.08	2.93
3.5	1000.75	333.58	2.32	2.20	2.32	2.20
4.0	1286.07	428.69	1.80	1.71	1.80	1.71
4.5	1608.97	536.32	1.44	1.37	1.44	1.37
5.0	1970.11	656.70	1.18	1.12	1.18	1.12

## e. Penempatan kaison pada abutmen

1. Diameter 2 m = 5 unit
2. Diameter 2.5 m = 4 unit
3. Diameter 3 m = 3 unit
4. Diameter 3.5 m = 2 unit
5. Diameter 4 m = 2 unit
6. Diameter 4.5 m = 2 unit
7. Diameter 5 m = 2 unit

Dari hasil perhitungan jumlah kaison untuk tiap-tiap diameter penampang dan berdasarkan pembagian ruang dalam menempatkan kaison pada abutmen, pondasi yang bisa gunakan adalah kaison dengan diameter 4.0, 4.5 dan 5.0 m dengan jumlah kaison masing-masing 2 unit.

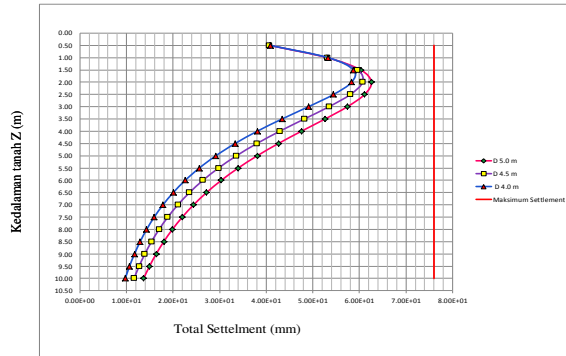


Gambar 12 Pemodelan Tekanan Tanah di Bawah Pondasi Kaison

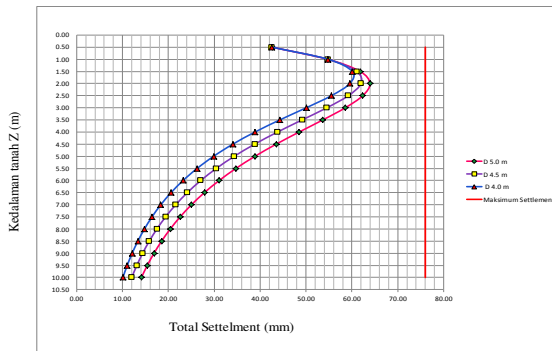
## Kontrol Penurunan

Parameter yang tidak diketahui adalah kedalaman ( $z$ ), dan yang tidak memiliki nilai pasti adalah  $\mu$ , dimana untuk tanah jenis

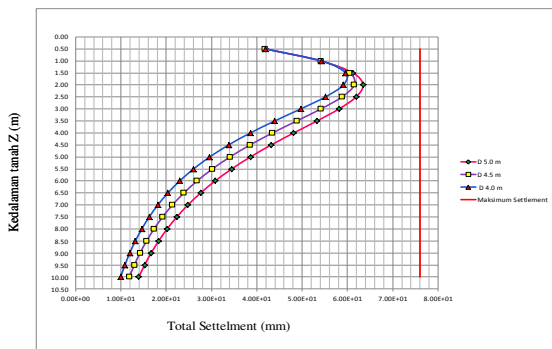
lempung  $\mu$  memiliki nilai antara 0.1–0.5, sehingga dengan cara perhitungan yang sama dengan diameter pondasi berbeda, dibuat hubungan antara settlement pondasi kaisan dengan kedalaman untuk diameter 4.0, 4.5, dan 5.0 m dengan kedalaman ( $z$ ) pada 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 6.5, 7.0, 8.5, 9.0, 9.5, dan 10 m, untuk nilai-nilai  $\mu = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$ , dan 0.5 sebagai berikut :



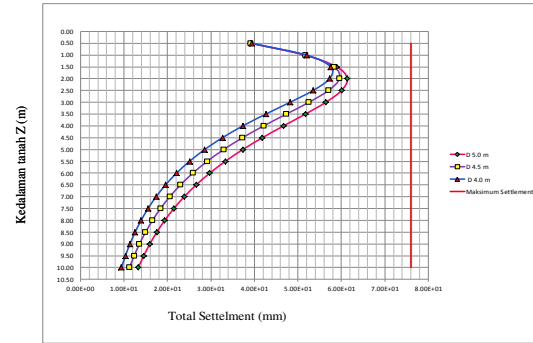
Gambar 13 Grafik Pengaruh  $z$  Terhadap Settlement Pondasi Sumuran untuk  $\mu = 0.1$



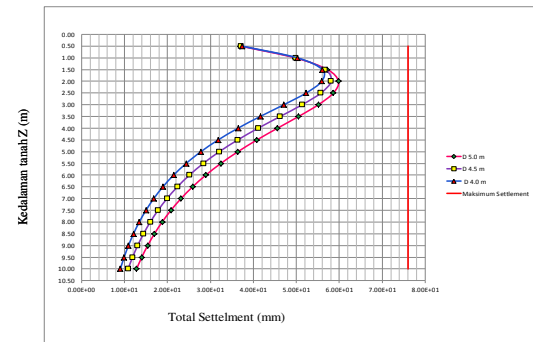
Gambar 14 Grafik Pengaruh  $z$  Terhadap Settlement Pondasi Sumuran untuk  $\mu = 0.2$



Gambar 15 Grafik Pengaruh  $z$  Terhadap Settlement Pondasi Sumuran untuk  $\mu = 0.3$



Gambar 16 Grafik Pengaruh  $z$  Terhadap Settlement Pondasi Sumuran untuk  $\mu = 0.4$



Gambar 17 Grafik Pengaruh  $z$  Terhadap Settlement Pondasi Sumuran untuk  $\mu = 0.5$

Berdasarkan hasil perhitungan kaisan, pondasi yang memenuhi syarat penurunan minimum 76 mm untuk tanah lempung dan bisa untuk menjadi pondasi jembatan adalah kaisan dengan diameter 4.0, 4.5, dan 5.0 m

## PENUTUP

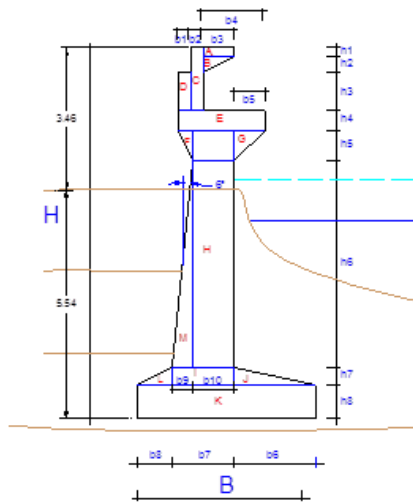
### Kesimpulan

1. Ketinggian abutmen adalah 9 m dengan posisi 3.46 m dari atas permukaan tanah, dan tertanam sedalam 5.54 m.
2. Penampang abutmen adalah sebagai berikut :

Tabel 14 Dimensi Penampang Abutmen

Penampang	Panjang (m)	Penampang	Panjang (m)
H	9.00	B	5.60
h1	0.20	b1	0.30
h2	0.40	b2	0.30
h3	0.90	b3	0.80
h4	0.50	b4	2.45
h5	0.75	b5	0.75
h6	5.00	b6	2.80
h7	0.45	b7	1.70
h8	0.80	b8	1.10
h9	0.60	b9	0.50
h10	1.40	b10	1.20





Gambar 18. Hasil Desain Abutmen

3. Diameter efektif pondasi sumuran yang digunakan agar bisa menopang struktur bangunan atas dan abutmen jembatan adalah sumuran yang tertanam sedalam 4 m di bawah abutmen dengan diameter yang bisa digunakan adalah abutmen dengan penampang berdiameter antara 4.0, 4.5, dan 5.0 m.

#### Saran

1. Perlu dilakukan analisis hidrologi secara lengkap.
2. Perlu dilakukan perhitungan dan desain tulangan pada abutmen dan pondasi kaisan.
3. Perlu dianalisis pengaruh beban dinamis pada struktur.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Badan Standarisasi Nasional, 2008. SNI 2833-2008. *Standar Perencanaan Gempa untuk Jembatan*, Jakarta.
- Bowles, Joseph E., 1997. *Foundations Analysis and Design*, Fifth edition, The McGraw-Hill Companies, Inc.
- Cristady, Hary., 2008. *Teknik Pondasi 2*, Beta Offset, Yogyakarta.
- Das, Braja M., 2007. *Principles of Foundation Engineering*, Seventh edition, RPK Editorial Services, Inc, USA.
- Das, Braja M., 1993. *Principles of Soil Dynamics*, PWS-KENT Publishing Company, Boston.
- Phatak, D.R., 1995. *Bridge Engineering*, Satya Prakashan, New Delhi.
- Supriadi, B., Muntohar, A.S., 2007. *Jembatan*, Beta Offset, Yogyakarta.